

Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. № 3. С. 21–32.

Bulletin Samara State Agricultural Academy. 2022. № 3. P. 21–32.

ТЕХНОЛОГИИ, СРЕДСТВА МЕХАНИЗАЦИИ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Научная статья

УДК 631.171

doi: 10.55471/19973225_2022_7_3_21

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦЫ ПО ЛОПАСТЯМ
ГОРИЗОНТАЛЬНОГО РОТОРА

Владимир Юрьевич Зайцев¹, Константин Павлович Фудин², Владимир Викторович Коновалов³✉,
Марина Владимировна Донцова⁴, Светлана Станиславовна Петрова⁵

^{1, 2, 3, 4}Пензенский государственный технический университет, Пенза, Россия

⁵Самарский государственный аграрный университет, Усть-Кинельский, Самарская область, Россия

¹vluzai@gmail.com, <http://orcid/0000-0002-6230-0856>

²kpfudin@yandex.ru, <http://orcid/0000-0002-8611-1881>,

³konovalov-penza@rambler.ru✉, <http://orcid/0000-0002-5011-5354>

⁴dontmv@mail.ru, <http://orcid/0000-0003-2915-0881>

⁵svetychsa1368@mail.ru, <http://orcid/0000-0002-0243-8992>

Цель исследований – моделирование движения частиц, перемещающихся по поверхности внутренних лопастей горизонтального вращающегося ротора. Для эффективной работы используемых машин при их конструировании требуется отыскание рациональных или оптимальных конструктивных, кинематических и технологических параметров. В результате экспериментального обоснования зоны работоспособности возможно отыскание потребных значений параметров статистическими методами. В связи с развитием компьютерной техники и разработкой программ для моделирования методом конечных элементов применение данного способа моделирования получает широкое распространение. С одной стороны имеется преимущество данного метода, с другой стороны получение достоверного результата требует специализации компьютерной программы под рассматриваемые условия процесса и задачи исследований, опыта оператора по проведению подобных исследований, по настройке исходных данных и разметке расчетной сетки. Методика исследований предусматривала силовой анализ действующих на частицу сил в процессе ее движения по лопасти вращающегося ротора и последующее математическое моделирование движения частицы в математическом пакете MatchCAD. На основе полученных выражений осуществлялось построение графиков движения частиц по результатам моделирования. Проведенный силовой анализ взаимодействия частицы с

лопастями вращающегося горизонтального ротора позволил получить выражения, описывающие движение частицы по движущейся лопасти к центру ротора. На основе выявленных выражений численное моделирование позволило установить графики влияния частоты вращения ротора и коэффициентов трения на угол подъема частиц лопастями, законы движения частицы по лопасти ротора, параметры падения частицы с лопасти. Использование полученных математических моделей позволяет облегчить решение конкретных практических задач.

Ключевые слова: ротор, лопасти ротора, движение материала по лопасти, моделирование.

Для цитирования: Зайцев В. Ю., Фудин К. П., Коновалов В. В., Донцова М. В., Петрова С. С. Моделирование движения частицы по лопастям горизонтального ротора // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2022. №3. С. 21–32. doi: 10.55471/19973225_2022_7_3_21

TECHNOLOGY, MEANS OF MECHANIZATION AND POWER EQUIPMENT IN AGRICULTURE

Original article

SIMULATION OF PARTICLE MOTION ALONG THE BLADES OF A HORIZONTAL ROTOR

Vladimir Yu. Zaitsev¹, Konstantin P. Fudin², Vladimir V. Konovalov³✉, Marina V. Dontsova⁴,
Svetlana S. Petrova⁵

^{1, 2, 3, 4}Penza State Technical University, Penza, Russia

⁵Samara State Agrarian University, Ust-Kinelsky, Samara Region, Russia

1vluzai@gmail.com, <http://orcid/0000-0002-6230-0856>

2kpfudin@yandex.ru, <http://orcid/0000-0002-8611-1881>,

3konovalov-penza@rambler.ru✉, <http://orcid/0000-0002-5011-5354>

4dontmv@mail.ru, <http://orcid/0000-0003-2915-0881>

5svetychsa1368@mail.ru, <http://orcid/0000-0002-0243-8992>

The purpose of the research is to simulate the motion of particles moving along the surface of the inner blades of a horizontal rotating rotor. For the effective operation of the machines used in their design, it is necessary to find rational or optimal design, kinematic and technological parameters. As a result of the experimental substantiation of the working capacity zone, it is possible to find the required parameter values by statistical methods. Due to the development of computer technology and the development of programs for modeling by the finite element method, the use of this modeling method is becoming widespread. On the one hand, there is the advantage of this method, on the other hand, obtaining a reliable result requires the specialization of the computer program for the process conditions and research tasks under consideration, the operator's experience in conducting such studies, setting up the source data and marking the computational grid. The research methodology included force analysis of the forces acting on the particle during its movement along the blade of a rotating rotor and subsequent mathematical modeling of the particle motion in the mathematical package MatchCAD. Based on the expressions obtained, particle motion graphs were constructed based on the simulation results. The force analysis of the interaction of a particle with the blades of a rotating horizontal rotor made it possible to obtain expressions describing the movement of a particle along a moving blade to the center of the rotor. Based on the identified expressions, numerical modeling allowed to establish graphs of the influence of the rotor rotation frequency and friction coefficients on the angle of lifting of particles by the blades, the laws of particle motion along the rotor blade, the parameters of particle fall from the blade. The use of the obtained mathematical models makes it easier to solve specific practical problems.

Keywords: rotor, rotor blades, material movement along the blade, modeling.

For citation: Zaitsev, V. Yu., Fudin, K. P., Konovalov, V. V., Dontsova, M. V. & Petrova, S. S. (2022). Simulation of particle motion along the blades of a horizontal rotor. *Izvestiia Samarskoi gosudarstvennoi selskokhoziaistvennoi akademii (Bulletin Samara State Agricultural Academy)*, 3, 21–32 (In Russ.). doi: 10.55471/19973225_2022_7_3_21

Современное развитие человеческого общества требует для своего существования использование разнообразных материалов с разными свойствами, а также машин и аппаратов разнообразной конструкции и с разными технологическими процессами.

Для эффективной работы используемых машин при их конструировании требуется отыскание рациональных или оптимальных конструктивных, кинематических и технологических параметров. В результате экспериментального обоснования зоны работоспособности возможно отыскание требуемых значений параметров статистическими методами [1]. Однако, экспериментальное обоснование весьма трудозатратно и требует высоких финансовых вложений.

В последние годы в связи с развитием компьютерной техники и разработкой программ для моделирования методом конечных элементов применение данного способа моделирования получает широкое распространение [2, 3]. С одной стороны имеется преимущество данного метода, с другой стороны получение достоверного результата требует специализации компьютерной программы под рассматриваемые условия процесса и задачи исследований, опыта оператора по проведению именно подобных исследований, по настройке исходных данных и разметке расчетной сетки. Учитывая, что отыскивается условие равновесия показателей по узлам сетки, полученный результат стремится к частному случаю. Малейшие недочеты или сбои приводят к снижению вероятности правильного результата расчета. Кроме того, отсутствует

динамика изменения показателей при изменении исходных условий. В связи с этим, традиционные аналитические методы расчета обладают преимуществом именно в направлении получения результатов для интервалов изменения исходных показателей. К сожалению, в силу разнообразия конструкций устройств и машин, и стоящих задач, требуется разработка большого количества подобных моделей.

Существующие модели, связанные с движениями частиц и применимые в сельском хозяйстве, направлены в большинстве случаев на рассмотрение движения частиц при взаимодействии с лопастями определенной конструкции [4, 5], движения по поверхностям с разной степенью криволинейности [6-9]. При этом рабочий орган может быть, как вертикальным [10, 11], так и горизонтальным [12, 13]. В ряде случаев рассматриваются как конкретные среды, взаимодействующие с частицами [14-16], так и условия разрушения частиц [17-20].

Анализируя моделируемые рабочие органы, следует отметить, что моделирование движения частиц по продольным лопастям горизонтального лопастного ротора не было обнаружено.

Цель исследований – моделирование движения частиц, перемещающихся по поверхности внутренних лопастей горизонтального вращающегося ротора.

Задачи исследований – определить основные силовые факторы и конструктивные параметры, влияющие на характер движения частицы по лопастям горизонтального ротора, а на их основе – установить выражения, описывающие движение частицы по лопастям; на основе полученных выражений провести компьютерное моделирование движения частицы и осуществить графический анализ результатов моделирования.

Материалы и методы исследований. На основании обзора литературы и анализа условий движения частицы по лопасти ротора уточнены выражения, описывающие движение частицы по лопасти. В результате математического моделирования в математическом пакете MatchCAD движения частицы осуществлено построение графиков, описывающих численные значения показателей движения.

Результаты исследований. Рассмотрим горизонтальный ротор с лопастями, расположенными вдоль образующей ротора. Для определения предельной высоты подъема частицы во вращающемся роторе рассмотрим: а) вращающийся с постоянной угловой скоростью ω полый цилиндр радиуса R , ось вращения которого параллельна линии горизонта, с лопастями шириной l , расположенными вдоль образующей цилиндра; б) частицу не сферической формы с условным диаметром d , находящуюся в начальном положении в нижней точке внутри цилиндра и удаленную от днища цилиндра на некоторое расстояние z . Расчетная схема механизма ротора с частицей приведена на рисунке 1.

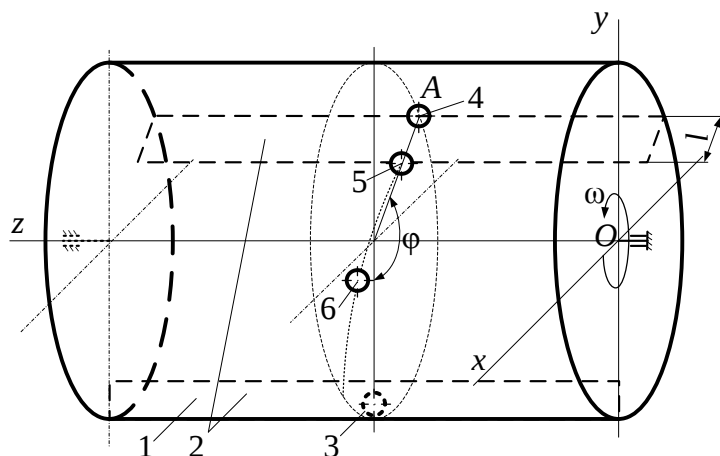


Рис. 1. Расчетная схема механизма горизонтального ротора с лопастями, параллельными образующей:

1 – ротор; 2 – лопасти; 3 – частица в начальном положении; 4 – частица в предельном положении; 5 – частица на краю лопасти; 6 – частица в произвольном положении на траектории свободного падения

Проведем координатные оси $Oxyz$ и рассмотрим условия движения частицы в полости ротора. При вращении ротора частица будет перемещаться вместе с лопастью ротора до некоторого предельного положения 4, при дальнейшем вращении ротора частица начинает перемещаться по лопасти, достигнув края лопасти 5 частица падает в полости ротора с начальной скоростью V_0 под действием силы тяжести G и силы сопротивления воздуха F . Произвольное положение частицы на траектории свободного падения обозначено позицией 6 (рис. 1).

Первым исследуем предельное положение равновесия частицы на лопасти ротора, которое определяется предельным углом φ (рис. 1). Для этого рассмотрим частицу в произвольном положении на лопасти ротора в плоскости Oxy (рис. 2). Дополнительно проведем оси скоростной системы координат Atn . На частицу в произвольном положении равновесия действуют силы: сила тяжести G , нормальная реакция лопасти смесителя N_1 , нормальная реакция боковой поверхности барабана N_2 , сила трения F_{fr} и центробежная сила инерции Φ (рис. 2).

Уравнения равновесия частицы в проекциях на координатные оси At и An имеют вид:

$$\Sigma F_{k\tau} = 0, N_1 - G \cdot \sin(\varphi) = 0, \quad (1)$$

$$\Sigma F_{kn} = 0, N_2 - G \cdot \cos(\varphi) - \Phi - F_{fr} = 0, \quad (2)$$

где $G = m \cdot g$, m – масса частицы, g – ускорение свободного падения; $F_{fr} = N_1 \cdot f$, f – коэффициент трения между лопастью и частицей; $\Phi = m \cdot \omega^2 \cdot R$.

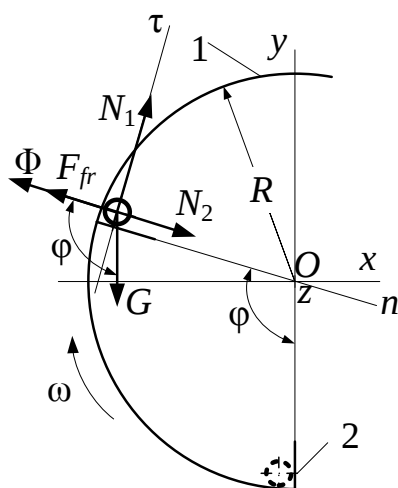


Рис. 2. Силы, действующие на частицу в произвольном положении равновесия:

1 – барабан; 2 – лопасть

Нормальная реакция лопасти барабана N1 определяется из (1):

$$N_1 = m \cdot g \cdot \sin(\varphi) \quad (3)$$

Таким образом, уравнение (2) примет следующий вид

$$N_2 - m \cdot g \cdot \cos(\varphi) - m \cdot \omega^2 \cdot R - m \cdot g \cdot f \cdot \sin(\varphi) = 0 \quad (4)$$

Движение частицы по лопасти начнется в том момент времени, когда нормальная реакция стенки ротора обратится в ноль ($N_2=0$). Таким образом, уравнение (4) примет вид:

$$-m \cdot g \cdot \cos(\varphi) - m \cdot \omega^2 \cdot R - m \cdot g \cdot f \cdot \sin(\varphi) = 0 \quad (5)$$

Из уравнения (5) найдем предельный угол подъема частицы, при превышении которого начинается движение частицы по лопасти ротора

$$\varphi_0 = 2 \cdot \arctan \left(\frac{\sqrt{f^2 \cdot g^2 - R^2 \cdot \omega^4 + g^2} + f \cdot g}{g - R \cdot \omega^2} \right) \quad (6)$$

Зависимость угла начала движения частицы по лопасти ротора в зависимости от числа оборотов для различных значений коэффициента трения приведена на рисунке 3.

Зависимость угла начала движения частицы по лопасти ротора в зависимости от начального положения частицы на лопасти для коэффициента трения $f = 0,6$ приведена на рисунке 4.

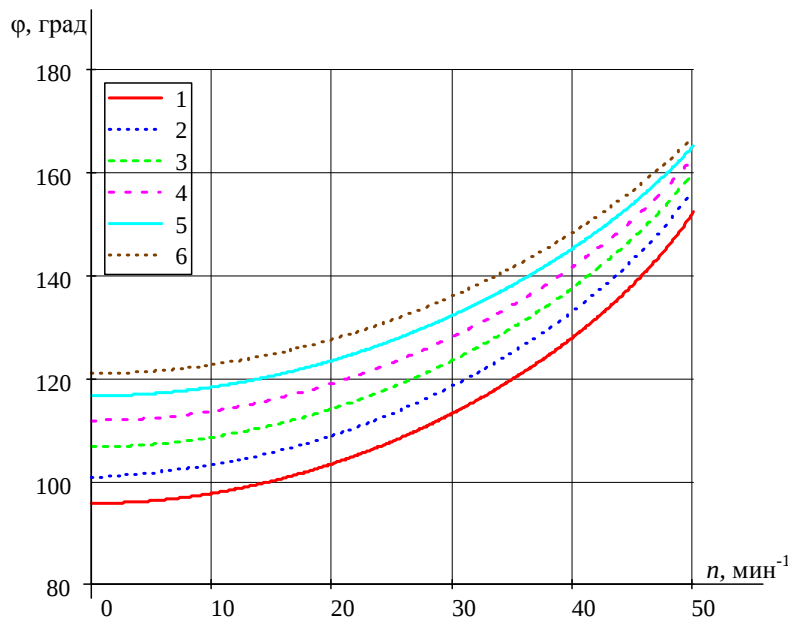


Рис. 3. Зависимость угла начала движения частицы по лопасти от частоты вращения ротора и коэффициента трения частицы по лопасти:

1 – коэффициент трения 0,1; 2 – коэффициент трения 0,2; 3 – коэффициент трения 0,3;
4 – коэффициент трения 0,4; 5 – коэффициент трения 0,5; 6 – коэффициент трения 0,6

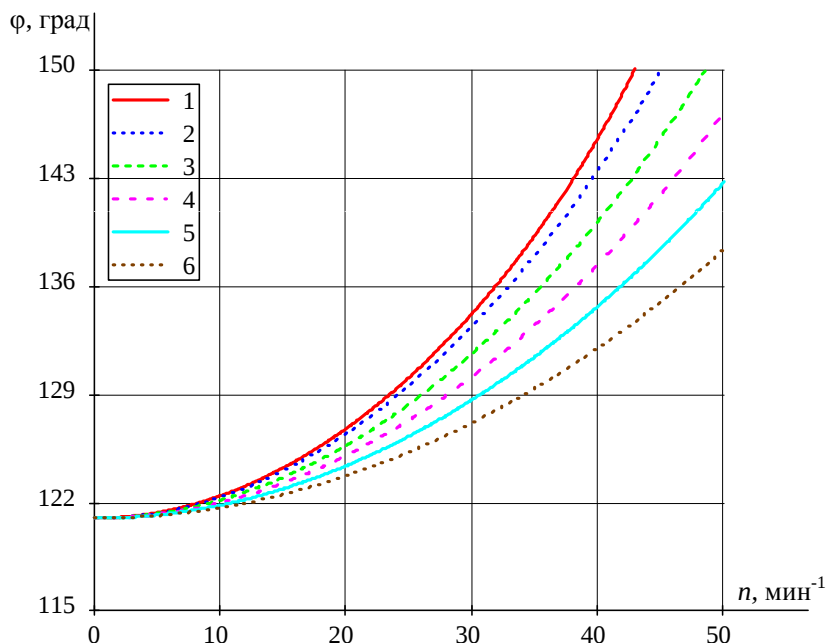


Рис. 4. Зависимость угла начала движения частицы по лопасти ротора в зависимости от начального положения частицы на лопасти:

1 – начальное положение частицы на лопасти, $r = 0,275$ м; 2 – начальное положение частицы на лопасти, $r = 0,25$ м;
3 – начальное положение частицы на лопасти, $r = 0,215$ м; 4 – начальное положение частицы на лопасти, $r = 0,185$ м;
5 – начальное положение частицы на лопасти, $r = 0,155$ м; 6 – начальное положение частицы на лопасти, $r = 0,125$ м

Далее исследуем движение частицы по лопасти ротора, начальное положение частицы на лопасти определяется выражением (6). Рассмотрим частицу в произвольном положении на лопасти ротора в плоскости Оху (рис. 5). Дополнительно проведем оси полярной системы координат Аерсф. На частицу в произвольном положении действуют силы: сила тяжести G , нормальная реакция лопасти ротора N , и сила трения F_{fr} (рис. 5).

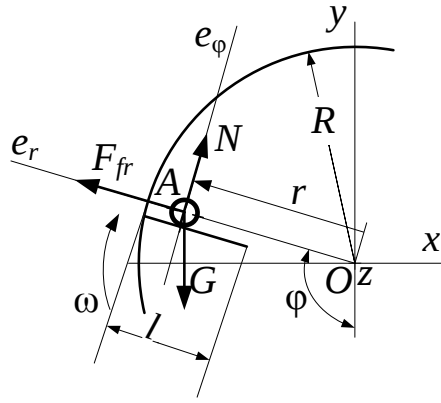


Рис. 5. Силы, действующие на частицу в произвольном положении при движении по лопасти

Дифференциальные уравнения движения частицы по лопасти ротора в проекциях на оси декартовой системы координат Oxy имеют вид (7) и на оси полярной системы координат $Aer\phi$ – вид (8):

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 \cdot r \cdot \sin(\varphi) - \frac{d^2 r}{dt^2} \cdot \sin(\varphi) &= -g \cdot \sin(\varphi) \cdot \cos(\varphi) - \\ &- g \cdot f \cdot \sin^2(\varphi) - 2 \cdot \frac{d\varphi}{dt} \cdot \frac{dr}{dt} \cdot f \cdot \sin(\varphi), \\ \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 \cdot r \cdot \cos(\varphi) - \frac{d^2 r}{dt^2} \cdot \cos(\varphi) &= -g + g \cdot \sin^2(\varphi) - \\ &- g \cdot \sin(\varphi) \cdot f \cdot \cos(\varphi) - 2 \cdot \frac{d\varphi}{dt} \cdot \frac{dr}{dt} \cdot f \cdot \cos(\varphi), \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\frac{d^2 r}{dt^2} - \left(\frac{d\varphi}{dt} \right)^2 \cdot r = g \cdot f \cdot \sin(\varphi) + 2 \cdot \frac{d\varphi}{dt} \cdot \frac{dr}{dt} \cdot f + g \cdot \cos(\varphi) \quad (8)$$

Так как ротор вращается с постоянной угловой скоростью $\omega = \pi \cdot n / 30$, где n – число оборотов в минуту (мин-1), то текущий угол подъема частицы вместе с лопастью определяется выражением

$$\varphi = \varphi_0 + \frac{\omega}{t} = \varphi_0 + \frac{\pi \cdot n \cdot t}{30}, \quad (9)$$

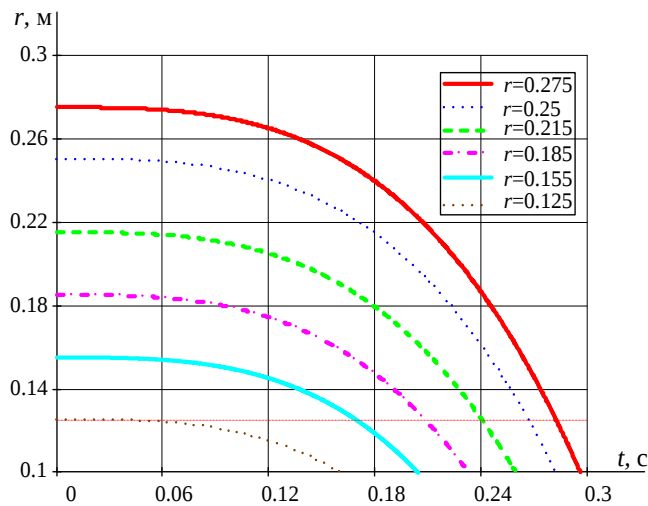
где t – время движения частицы по лопасти ротора, с.

Решение уравнений (7) и (8) определяет закон изменения относительной скорости и закон относительного движения частицы по лопасти ротора.

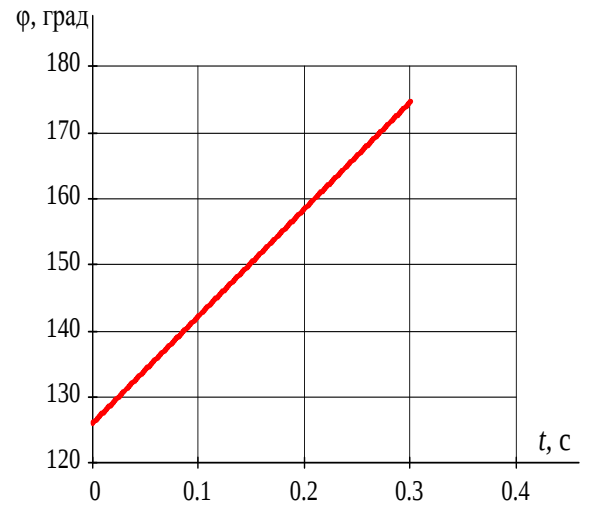
Закон переносного движения определяется уравнением (9), закон изменения переносной скорости частицы определяется уравнением

$$V_e = \omega \cdot r. \quad (10)$$

Результаты численного моделирования движения частиц по лопасти шириной $l = 0,15$ м при диаметре ротора $D = 0,55$ м, числе оборотов ротора $n = 27$ мин⁻¹ и коэффициенте трения $f = 0,6$ для разных начальных положений частицы на лопасти ($r = 0,275$ м, $r = 0,25$ м, $r = 0,215$ м, $r = 0,185$ м, $r = 0,155$ м, $r = 0,125$ м) на построенных математических моделях (7), (8), (9) и (10) определяют закон движения частиц по лопасти (рис. 6, а), угол подъема частиц до начала их схода с лопасти (рис. 6, б), скорость движения частиц по лопасти (рис. 7, а) и скорость движения частиц вместе с ротором (рис. 7, б), в том числе на ее краю.



а



б

Рис. 6. Зависимости движения частицы по лопасти ротора:

а – для относительного движения, $r = r(t)$; б – для переносного движения, $\phi = \phi(t)$; 1 – начальное положение частицы на лопасти, $r = 0,275$ м; 2 – начальное положение частицы на лопасти, $r = 0,25$ м; 3 – начальное положение частицы на лопасти, $r = 0,215$ м; 4 – начальное положение частицы на лопасти, $r = 0,185$ м; 5 – начальное положение частицы на лопасти, $r = 0,155$ м; 6 – начальное положение частицы на лопасти, $r = 0,125$ м

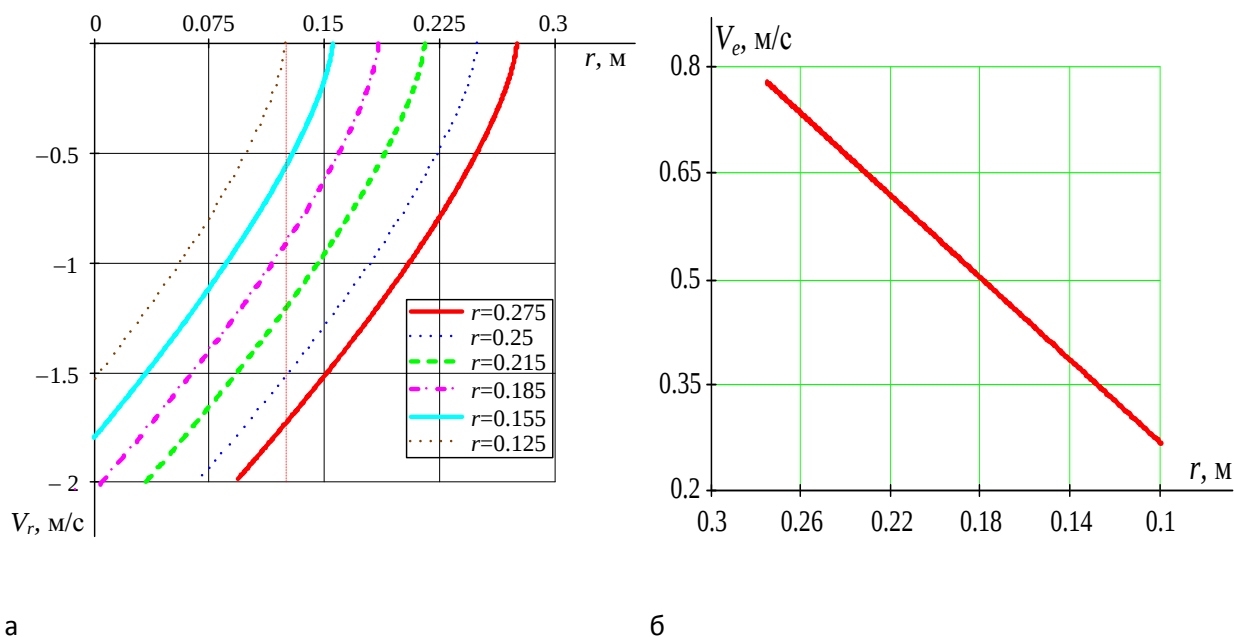


Рис. 7. Зависимости изменения скорости частицы при движении по лопасти ротора:

а – для изменения относительной скорости, $V_r = V_r(r)$; б – для изменения переносной скорости, $V_e = V_e(r)$; 1 – начальное положение частицы на лопасти, $r = 0,275$ м; 2 – начальное положение частицы на лопасти, $r = 0,25$ м; 3 – начальное положение частицы на лопасти, $r = 0,215$ м; 4 – начальное положение частицы на лопасти, $r = 0,185$ м; 5 – начальное положение частицы на лопасти, $r = 0,155$ м; 6 – начальное положение частицы на лопасти, $r = 0,125$ м

Результаты численного моделирования позволяют определить начальные условия свободного падения частицы (табл. 1), а именно время схода частицы с лопасти t_0 , предельный угол подъема частицы ϕ , координаты частицы по осям r , составляющие относительной скорости частицы V_r и переносную скорость V_e для определения траекторий полета частиц (рис. 8).

В момент времени t_0 (координата частицы на лопасти $r = 0,125$ м) частица начинает свободное падение в полости ротора с начальной скоростью $V_0 = \sqrt{V_r^2 + V_e^2}$ под действием силы тяжести G и силы сопротивления воздуха F . Силы, действующие на частицу в случае свободного падения, изображены на рисунке 8.

Таблица 1

Начальные условия полета частиц

№	Показатели				
	t, с	ϕ , рад	r, м	V_r , м/с	V_e , м/с
1	0,2829	2,9986	0,125	-1,7294	0,35313
2	0,267	2,9536	0,125	-1,5212	0,35313
3	0,2403	2,8781	0,125	-1,2031	0,35313

4	0,2082	2,7874	0,125	-0,90609	0,35313
5	0,26779	2,7121	0,125	-0,55643	0,35313
6	0	2,1987	0,125	0	0,35313

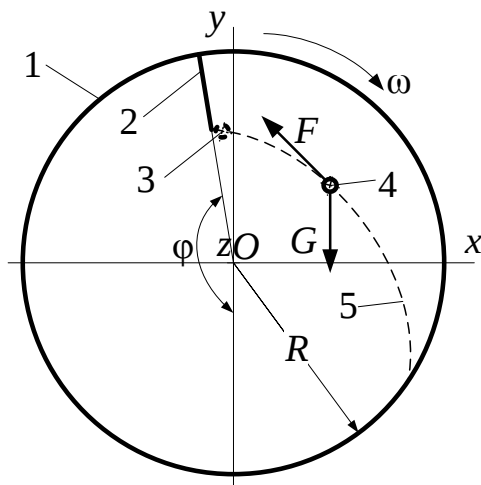


Рис. 8. Свободное падение частицы в полости ротора:

1 – полый цилиндр ротора; 2 – лопасть; 2 – начальное положение частицы; 4 – частица в произвольном положении;
5 – траектория движения частицы в полости ротора

Вектор силы тяжести G направлен вертикально вниз и численно равен

$$G = m \cdot g = \frac{\rho_1 \cdot \pi \cdot d^3}{6} \cdot \vec{g}, \quad (11)$$

$$m = \frac{\rho_1 \cdot \pi \cdot d^3}{6},$$

где ρ_1 – плотность частицы, кг/м³.

В зависимости от варианта использования ротора в конкретном техническом устройстве может как возникать необходимость учета сопротивления воздуха, так и отсутствовать. При этом в сушилках с продольным движением воздуха внутри вращающегося ротора вектор силы воздействия воздуха будет направлен вдоль продольной оси ротора, а в случае барабанного смесителя – навстречу движению частицы при ее падении с лопасти.

Вектор силы сопротивления воздуха F в конкретном примере направлен в сторону, противоположную вектору скорости частицы и численно равен [21]

$$F = \rho_2 \cdot A \cdot v^2 \cdot k \cdot k', \quad (12)$$

где ρ_2 – плотность воздуха, $A = \pi \cdot d^2/4$ – площадь поперечного сечения частицы, м²; k – коэффициент аэродинамического сопротивления; k' – коэффициент формы частицы, для частицы

сферической формы $k' = 1$; V – модуль абсолютной разности скоростей частицы и потока воздуха, м/с.

Коэффициент аэродинамического сопротивления определяется по формуле [22, 23]

$$k = \frac{24 \cdot \mu}{d \cdot \rho_2 \cdot V}, \quad (13)$$

где μ – динамическая вязкость воздуха, Па·с.

Дифференциальные уравнения свободного падения частицы в полости ротора в проекциях на оси декартовой системы координат Oxy примут вид

$$\left. \begin{aligned} \frac{d^2 x}{dt^2} &= -\frac{18 \cdot \pi \cdot k' \cdot \mu \cdot A}{\rho_1 \cdot \pi \cdot d^2} \cdot V_x, \\ \frac{d^2 y}{dt^2} &= -g + \frac{18 \cdot \pi \cdot k' \cdot \mu \cdot A}{\rho_1 \cdot \pi \cdot d^2} \cdot V_y. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Решение системы уравнений (14) определяет траектории движения частиц в полости ротора.

Траектория движения частицы в полости ротора диаметром 0,55 метра для частоты вращения $n = 27$ мин⁻¹ с начальными условиями, приведенными в таблице 1, представлены на рисунке 9.

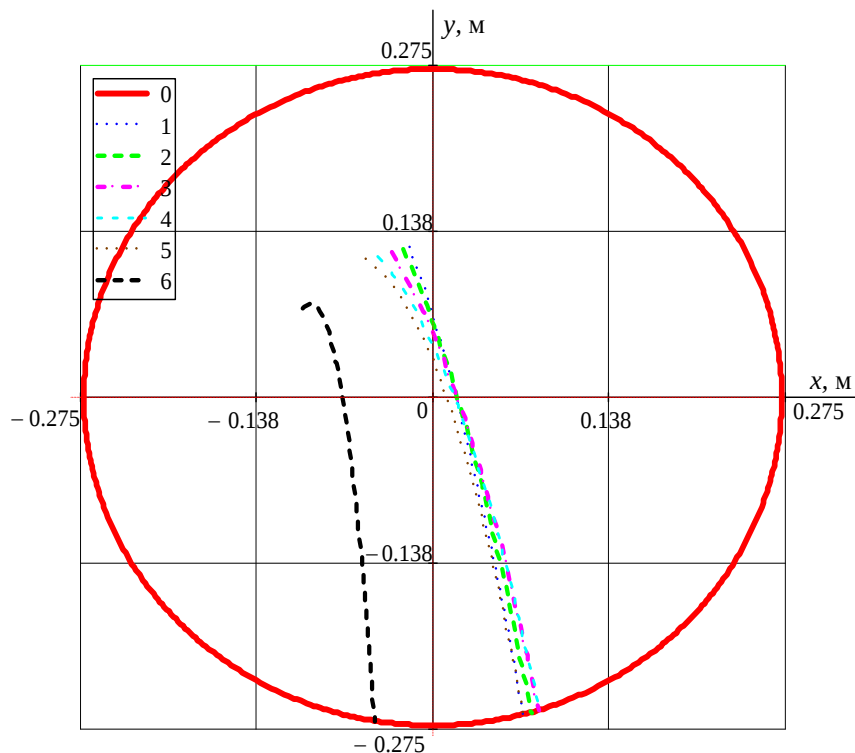


Рис. 9. Траектория движения частицы в полости ротора:

0 – ротор; 1, 2, 3, 4, 5, 6 – траектории частицы

Заключение. Проведенный силовой анализ позволил выявить основные выражения, необходимые для численного моделирования движения частицы по лопасти горизонтального ротора. Осуществленное математическое моделирование движения частицы по лопасти позволило установить графические модели изменения числовых значений ряда показателей, описывающих: зависимости угла начала движения частицы по лопасти от частоты вращения ротора и коэффициента трения частицы по лопасти; зависимости угла начала движения частицы по лопасти ротора от начального положения частицы на лопасти; закон движения частицы по лопасти ротора; закон изменения скорости частицы при движении по лопасти ротора; начальные условия полета частиц; траектории движения частицы, сошедшей с лопасти.

Список источников

1. Крылатова С. Р., Матвеев А. И., Лебедев И. Ф., Яковлев Б. В. Моделирование движения частицы в винтовом пневмосепараторе статистическими методами // Математические заметки СВФУ. 2018. Т. 25, № 1. С. 90–97.
2. Лобовиков Д. В., Харченко А. В., Матыгуллина Е. В. Тестирование компьютерных программ, используемых при моделировании методом дискретных элементов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. 2022. Т. 24, № 1. С. 79–86.
3. Кравцов А. В., Коновалов В. В., Зайцев В. Ю., Донцова М. В. Моделирование скоростного режима движения аэропродуктового потока с параллельно-последовательными участками // Известия Самарской государственной сельскохозяйственной академии. 2019. № 2. С. 75–83.
4. Шатохин В. М., Шатохина Н. В., Попова А. Н. Моделирование движения частицы грунта по шероховатой поверхности пространственной лопатки роторного грунтометателя // Строительство и техногенная безопасность. 2013. № 48. С. 201–210.
5. Андреев К. П., Костенко М. Ю., Шемякин А. В., Макаров В. А., Костенко Н. А. Исследование движения частицы удобрений по лопасти ворошителя // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева. 2016. № 4 (32). С. 65–68.
6. Харитонов А. О., Горячкина М. И. Численное моделирование движения частицы гранулированного материала по криволинейной поверхности деки // Машиностроитель. 2011. № 12. С. 18–20.
7. Гавриленков А. М., Каргашилов Д. В., Некрасов А. В., Романюк Е. В. Математическое моделирование движения частицы осажженной пыли по стенке противоточного циклона // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. 2013. № 4. С. 26–28.
8. Пилипака С. Ф., Несвидомин А. В. Моделирование движения частицы по шероховатой поверхности однополостного гиперboloида вращения // Наукові нотатки. 2015. № 48. С. 188–193.
9. Исаев Ю. М., Семашкин Н. М., Злобин В. А. Теоретическое описание движения семян сои в соосно расположенных цилиндрах // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2020. № 4 (52). С. 6–12.
10. Исаев Ю. М., Семашкин Н. М. Моделирование траектории движения частицы материала в устройстве со спирально-винтовым рабочим органом // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2014. № 1 (25). С. 156–160.

11. Исаев Ю. М., Шигапов И. И., Семашкин Н. М., Кошкина А. О., Абрамов А. Е. Перемещение частицы материала спиралью в вертикальном направлении // Сельский механизатор. 2019. № 12. С. 10–11.
12. Свиридов Л. Т., Дорняк О. Р., Костиков О. М. Моделирование движения частицы в шнековом питателе конической формы // Вестник Центрально-Черноземного регионального отделения наук о лесе Российской академии естественных наук Воронежской государственной лесотехнической академии. 2002. № 4. С. 166–176.
13. Барышникова О. О., Борискина З. М., Шубин А. А. Математическое моделирование режимов движения частицы в конвейерах // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 4. С. 248–257.
14. Сафаров Д. И., Емельянова О. В., Локтионова О. Г. Моделирование процесса движения частицы загрязнений в потоке жидкости // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. № 4-2 (43). С. 225–227.
15. Яблонский, В. О. Моделирование сепарации частиц твердой фазы из вязкопластической среды в гидроциклоне // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2020. № 3 (32). С. 6–11.
16. Шепелёв С. Д., Ческидов М. В., Шепелёв В. Д. Моделирование движения зерна в винтовом канале под воздействием воздушного потока // АПК России. 2019. Т. 26, № 4. С. 580–585.
17. Ляпцев С. А., Ахлюстина Н. В. Моделирование движения частицы в измельчителе // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2007. № 8. С. 107–110.
18. Сухопаров А. И., Иванов И. И., Плотникова Ю. А. Моделирование движения частицы в рабочей области центробежно-роторного измельчителя // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2019. № 57. С. 240–249.
19. Булатов С. Ю., Нечаев В. Н., Миронов К. Е. Исследование взаимодействия зерна с лопастями ротора дробилки закрытого типа // Вестник НГИЭИ. 2017. № 8 (75). С. 26–34.
20. Францкевич, В. С. Моделирование движения частицы материал в кольцевом зазоре валковой среднеходной мельницы // Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. 2004. № 4. С. 39–43.
21. Мударисов С. Г., Рахимов З. С. Обоснование параметров двухфазного течения «воздух – семена» при математическом описании работы пневматической системы зерновой сеялки // Вестник БГАУ. 2014. № 4. С. 85–91.
22. Давыдов С. Я. Расчет пневмотранспорта штучных грузов // Теория и практика мировой науки. 2016. №2 С. 54–59.
23. Крючин Н. П. Повышение эффективности распределительно-транспортирующих систем пневматических посевных машин : монография. Самара : РИЦ СГСХА. 2008.

References

1. Krylatova, S. R., Matveev, A. I., Lebedev, I. F. & Yakovlev, B. V. (2018). Modeling of particle motion in a screw pneumatic separator by statistical methods. Matematicheskie zametki SVFU (Mathematical notes

of NEFU), 25, 1,
90–97 (in Russ.).

2. Lobovikov, D. V. Kharchenko, A. V. & Matygullina, E. V. (2022). Testing of computer programs used in modeling by the method of discrete elements. Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie, materialovedenie (Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanical engineering, materials science), 24, 1, 79–86 (in Russ.).
3. Kravtsov, A. V., Konovalov, V. V., Zaitsev, V. Yu. & Dontsova, M. V. (2019). Modeling of the high-speed mode of movement of an aeroproduct stream with parallel-sequential sections. Izvestiia Samarskoi gosudarstvennoi selskokhoziaistvennoi akademii (Bulletin Samara state agricultural academy), 2, 75–83 (in Russ.).
4. Shatokhin, V. M., Shatokhina, N. V. & Popova, A. N. (2013). Modeling of the movement of a soil particle along the rough surface of the spatial blade of a rotary ground sweeper. Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost' (Construction and technogenic safety), 48, 201–210 (in Russ.).
5. Andreev, K. P., Kostenko, M. Yu., Shemyakin, A. V., Makarov, V. A. & Kostenko, N. A. (2016). Investigation of the movement of a fertilizers particle along the blade of the agitator. Vestnik Riazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P. A. Kostycheva (Herald of Ryazan State Agrotechnological University Named after P.A. Kostycheva), 4 (32), 65–68 (in Russ.).
6. Kharitonov, A. O. & Goryachkina, M. I. (2011). Numerical modeling of the motion of a particle of granular material along a curved surface of a soundboard. Mashinostroitel' (Mashinostroitel), 12, 18–20 (in Russ.).
7. Gavrilencov, A. M., Kargashilov, D. V., Nekrasov, A. V. & Romanyuk, E. V. (2013). Mathematical modeling of the motion of a particle of deposited dust along the wall of a countercurrent cyclone. Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyah – MMTT (Mathematical methods in engineering and technology – MMET), 4, 26–28 (in Russ.).
8. Pilipaka, S. F. & Nesvidomin, A. V. (2015). Modeling of particle motion on a rough surface of a single-cavity hyperboloid of rotation. Naukovi notatki (Naukovi notatki), 48, 188–193 (in Russ.).
9. Isaev, Yu. M., Semashkin, N. M. & Zlobin, V. A. (2020). Theoretical description of the movement of soybean seeds in coaxially arranged cylinders. Vestnik Uliianovskoi gosudarstvennoi sel'skokhoziaistvennoi akademii (Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy), 4 (52), 6–12 (in Russ.).
10. Isaev, Yu. M. & Semashkin, N. M. (2014). Modeling of the trajectory of a material particle in a device with a spiral-screw working body. Vestnik Uliianovskoi gosudarstvennoi sel'skokhoziaistvennoi akademii (Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy), 1 (25), 156–160 (in Russ.).
11. Isaev, Yu. M., Shigapov, I. I., Semashkin, N. M., Koshkina, A. O. & Abramov, A. E. (2019). Movement of a material particle by a spiral in a vertical direction. Sel'skii mekhanizator (Selskiy Mechanizator), 12, 10–11 (in Russ.).
12. Sviridov, L. T., Dorniyak, O. R. & Kostikov, O. M. (2002). Modeling of particle motion in a screw feeder of a conical shape. Vestnik Central'no-Chernozemnogo regional'nogo otdeleniya nauk o lese Rossijskoj akademii estestvennykh nauk Voronezhskoj gosudarstvennoj lesotekhnicheskoy akademii (Bulletin of the Central Chernozem Regional Department of Forest Sciences of the Russian Academy of Natural Sciences of the Voronezh State Forestry Academy), 4, 166–176 (in Russ.).

13. Baryshnikova, O. O., Boriskina, Z. M. & Shubin, A. A. (2016). Mathematical modeling of particle motion modes in conveyors. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* (Izvestiya Tula State University. Technical sciences), 4, 248–257 (in Russ.).
14. Safarov, D. I., Emelyanova, O. V. & Loktionova, O. G. (2012). Modeling of the process of motion of a particle of pollutants in a liquid flow. *Izvestiya YUgo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta* (Proceedings of the Southwestern State University), 4-2 (43), 225–227 (in Russ.).
15. Yablonsky, V. O. (2020). Modeling of separation of solid phase particles from a viscoplastic medium in a hydrocyclone. *Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport* (Energy and resource saving: industry and transport), 3 (32), 6–11 (in Russ.).
16. Shepelev, S. D., Cheskidov, M. V. & Shepelev, V. D. (2019). Modeling of grain movement in a screw channel under the influence of air flow. *APK Rossii* (Agroindustrial Complex of Russia), 26, 4, 580–585 (in Russ.).
17. Lyaptsev, S. A. & Akhlyustina, N. V. (2007). Modeling of particle motion in a shredder. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Gornyj zhurnal* (Izvestia of higher educational institutions. Mining magazine), 8, 107–110 (in Russ.).
18. Sukhoparov, A. I., Ivanov, I. I. & Plotnikova, Yu. A. (2019). Modeling of particle motion in the working area of a centrifugal rotary shredder. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* (News of the St. Petersburg State Agrarian University), 57, 240–249 (in Russ.).
19. Bulatov, S. Yu., Nechaev, V. N. & Mironov, K. E. (2017). Investigation of the interaction of grain with the rotor blades of a closed-type grinder. *Vestnik NGIEI* (Bulletin NGIEI), 8 (75), 26–34 (in Russ.).
20. Frantskevich, V. S. (2004). Modeling of the motion of a material particle in the annular gap of a medium-speed roller mill. *Izvestiya Nacional'noj akademii nauk Belarusi. Seriya fiziko-tekhnicheskikh nauk* (Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series), 4, 39–43 (in Russ.).
21. Mudarisov, S. G. & Rakhimov, Z. S. (2014). Substantiation of the parameters of the two-phase flow «air – seeds» in the mathematical description of the operation of the pneumatic system of a grain seeder. *Vestnik Bashkirskego gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* (Vestnik Bashkir State Agrarian University), 4, 85–91 (in Russ.).
22. Davydov, S. Ya. (2016). Calculation of pneumatic transport of piece loads. *Teoriya i praktika mirovoj nauki* (Theory and practice of world science), 2, 54–59 (in Russ.).
23. Kryuchin, N. P. Improving the efficiency of distribution and transporting systems of pneumatic sowing machines. Samara: PC Samara SAA, 2008.

Информация об авторах:

В. Ю. Зайцев – кандидат технических наук, доцент;

К. П. Фудин – аспирант;

В. В. Коновалов – доктор технических наук, профессор;

М. В. Донцова – кандидат технических наук, доцент;

С. С. Петрова – кандидат технических наук, доцент.

Information about the authors:

V. Yu. Zaitsev – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;

K. P. Fudin – postgraduate student;

V. V. Konovalov – Doctor of Technical Sciences, Professor;

M. V. Dontsova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor;

S. S. Petrova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The authors declare no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 23.04.2022; одобрена после рецензирования 12.05.2022; принята к публикации 28.06.2022.

The article was submitted 23.04.2022; approved after reviewing 12.05.2022; accepted for publication 28.06.2022.